

## RESUMEN

El proceso de combustión es el que genera mayores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con la gasificación, pirólisis y digestión. Las emisiones en la combustión son las más altas, si los combustibles utilizados son el carbón y la combinación de carbón con biomasa, con valores de  $2.7 \times 10^{-7}$  y  $2.5 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub> respectivamente. Sin embargo, con un costo de  $\$8.33 \times 10^{-6}$  usd/KJ<sub>e</sub>, resulta ser la tecnología más económica. Si la combustión se realiza únicamente con biomasa residual, las emisiones se reducen hasta  $9.7 \times 10^{-9}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub> y su costo de generación es de  $\$1.58 \times 10^{-5}$  usd/KJ<sub>e</sub>. En cuanto a la pirólisis de los residuos sólidos hasta su generación de energía eléctrica, genera emisiones de  $1.2 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>, con un costo de generación de  $\$1.1 \times 10^{-5}$  usd/KJ<sub>e</sub>. Una planta es autosuficiente cuando en la misma instalación se produce el combustible y se genera la energía eléctrica, evitando así el transporte del combustible. La emisión de GEI en una planta autosuficiente que se alimenta con aceite pirolítico, obtenido de los mismos residuos orgánicos, se reduce a  $1.2 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>. La gasificación de residuos sólidos genera  $4.9 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>, lo cual representa la menor emisión de GEI a diferencia de las otras tecnologías. Cuando en la gasificación hay alimentación dual de combustible biomasa y carbón hay una disminución de emisiones hasta  $1.02 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>. En cuanto a los procesos anaerobios se reportan dos casos: 1) Rellenos sanitarios emiten GEI comparables a la emisión en la combustión de combustóleo ( $2.0 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>), 2) Digestores emiten menores cantidades de GEI, que los rellenos sanitarios ( $9.0 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>).

Se concluye que de los 4 procesos de conversión a energía eléctrica estudiados (3 termoquímicos y 1 bioquímico), la digestión y la gasificación son los mejores procesos para el tratamiento de los residuos. La digestión (proceso bioquímico) tiene un costo de generación de  $\$1.6 \times 10^{-5}$  usd/KJ<sub>e</sub> y la gasificación (proceso termoquímico) de  $\$1.0 \times 10^{-5}$  usd/KJ<sub>e</sub>. Dado que la gasificación de los residuos resulta ser la menos contaminante con  $4.9 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>, en tanto que la digestión emite  $2.0 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>. México cuenta con un potencial de 2.5 GWh proveniente de la utilización del biogás de los 137 rellenos sanitarios, donde se lleva a cabo el proceso anaerobio. Por lo que, a corto plazo convendría únicamente cavar los pozos para la extracción de dicho biogás y utilizarlo para la generación eléctrica. En tanto que si se piensa en instalar nuevas tecnologías, la gasificación es la mejor opción por el lado técnico, económico y ambiental.

## INTRODUCCIÓN

En México, como en otros países, el proceso de industrialización que se intensificó a partir de la segunda mitad del siglo pasado, derivó en una mayor demanda de materias primas, para satisfacer el creciente consumo de bienes y servicios de una población, cada vez más numerosa y con patrones de consumo cada vez más demandantes. En consecuencia se agravaron los problemas ambientales, como la contaminación del aire y la generación de residuos tanto urbanos como industriales. Lo anterior se acompañó, inevitablemente de la disposición inadecuada de los residuos a lo largo del territorio, lo que afectó y continúa impactando directa o indirectamente la salud de la población y de los ecosistemas naturales

Tradicional e idealmente, la basura municipal se ha visto como una oportunidad para reciclar materiales tales como: El vidrio, el aluminio, el papel y el cartón, así como la de producir composta a partir de la parte orgánica de la basura, que es útil para mantener la fertilidad del suelo o mejorar su capacidad de retención de humedad, intercambio catiónico y porosidad en los jardines públicos municipales.

En la última centuria la basura ha sido considerada como un recurso energético; ya que por un lado cuando es depositada en rellenos sanitarios o basureros, ésta produce biogás con un contenido de 50% de metano, y por el otro puede someterse a procesos termoquímicos de incineración o gasificación. Lo cual da lugar a la generación de energía, ya sea vía generación de vapor en el caso de la incineración, o una mezcla de gases compuesta por CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en el caso de la gasificación, que también puede ser empleado para generar vapor, emplearse como combustible en motores de combustión interna o en celdas de combustible en el futuro cercano.

Un factor importante de la basura como insumo energético es el referente a su poder calorífico, ya que de éste depende la cantidad de energía que se pueda generar, así como de su contenido de humedad. El poder calorífico de la basura típico oscila entre 4.2 hasta 21.2 MJ/Kg dependiendo del contenido de humedad que contenga.

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son los generados principalmente en los hogares. El volumen estimado de generación nacional de RSU creció, entre 1997 y 2009, alrededor de 30%, pasando de 29.3 a 38.3 millones de toneladas. La generación per cápita diaria creció en el mismo periodo de 840 a 980 gramos, para lo cual se cuenta con un total de 137 rellenos sanitarios con una capacidad de 22.175 billones de toneladas, para disposición final, 24 rellenos de tierra controlados con una capacidad de 3.924 billones de toneladas y 161 sitios controlados con capacidad de 26.1 billones de toneladas. Se estima que el 67% de los RSU generados en el país se dispone en rellenos sanitarios y sitios controlados y el 33% restante en sitios no controlados.

México cuenta únicamente con una planta con capacidad de 16.96 MW en Nuevo León aprovechando el biogás del relleno sanitario. A la fecha, con la operación de este sistema se han generado más de 310,000 MWh de electricidad, los cuales se han aprovechado para el alumbrado público de la ciudad de Monterrey y su área conurbada, así como en otras aplicaciones, especialmente para el Metro de la ciudad de Monterrey. Se estima que durante los años en que ha operado Bioenergía de Nuevo León se han evitado más de 61,000 ton de emisiones de metano a la atmósfera, lo que equivale a más de 1,300,000 toneladas de bióxido de carbono.

Existen tres procesos termoquímicos para el tratamiento de la basura, estos son: La incineración, la gasificación y la pirólisis. No existen en México en la actualidad plantas de tratamiento termoquímico como la incineración o gasificación de la basura. La inversión requerida para la generación de energía

con biogás oscila entre 750 mil y 1.3 millones de dólares por MW instalado, en tanto que para las plantas de incineración y gasificación oscila entre 2.2 y 4.5 millones de dólares por MW instalado.

La tendencia mundial de estas tecnologías a un horizonte de 25 años, está ligada fuertemente al impacto de los hidrocarburos sobre el efecto invernadero y calentamiento global, así como al eventual declive de los yacimientos, y al incremento de los precios del petróleo, en el contexto internacional. En Europa existe una ley que limita el crecimiento de los rellenos sanitarios en los países miembros de la Unión Europea, por lo que se estima que en los próximos años éstos desaparezcan, y crezcan primero las plantas de incineración con generación de energía, y posteriormente las plantas de gasificación, así como una actividad mayor en el reciclaje.

Existen en el mundo alrededor de 1,152 plantas que suman una capacidad de generación eléctrica de 3,929 MW y generan en promedio 3.1 m<sup>3</sup>/ton\*año de biogás de relleno sanitario. De estas 1,152 plantas, 734 están en Europa y 354 en Estados Unidos, 15 en Canadá, 19 en Asia, 18 en Australia, 8 en Sudamérica y 4 en África. Las plantas en Europa en promedio tienen una capacidad instalada de 1.73 MW por planta, en tanto que en Estados Unidos es de 6.7, lo cual indica que las plantas de Estados Unidos son muy grandes comparadas con las de Europa.

En E.E. U.U el 8% de sus residuos es incinerado, contando con 750 plantas de incineración con capacidad de 29 millones de toneladas/año, 7% enviada a compostaje, 20% reciclada y 65% enviada a rellenos sanitarios. En China el 2% de sus residuos es incinerado, 70% enviado a rellenos sanitarios, 20% a compostaje y 10% no definido.

México es el 3<sup>er</sup> principal emisor de metano generado en los rellenos sanitarios, el metano tiene un potencial de aproximadamente 24.5 veces mayor que el CO<sub>2</sub>, gas que favorece el efecto de invernadero y por ende el calentamiento global. Ésta es la razón por la cual se ha realizado este trabajo de comparación, ambiental, técnico y económico, entre los procesos de transformación de la biomasa para producir electricidad, y con ello, determinar cuál es el mejor proceso de tratamiento para la basura que se genera en México.

## **1.1 Objetivo general**

Realizar un análisis energético, económico y ambiental entre procesos que transforman la biomasa en energía eléctrica considerando a los procesos de combustión, gasificación, pirólisis y digestión para la transformación de residuos sólidos urbanos en México.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Conocer los procesos de transformación de los residuos y qué procesos existen en México
- Determinar mediante el análisis ambiental qué proceso de transformación es menos contaminante por unidad de energía
- Determinar mediante el análisis económico qué proceso de transformación tiene menor costo por unidad de energía
- Dar a conocer qué proceso de transformación tiene mayor viabilidad para el tratamiento de residuos sólidos en México